

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікро- та наноелектроніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри
Анатолій ОРЛОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2020 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка
(код і назва)

на тему: Електрофізичні властивості структури меланін/пористий кремній

Виконав: студент 4 курсу, групи ДП-62
(шифр групи)

Тихоненко Олександр Валерійович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник доц., к.т.н., Обухова Т.Ю.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.
Георгій СВЄЧНИКОВ

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Завдання на дипломну роботу

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація)

153 Мікро-та наносистемна техніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Анатолій ОРЛОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ на дипломний проект (роботу) студенту

Тихоненко Олександр Валерійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Електрофізичні властивості структури меланін/пористий кремній

керівник проекту (роботи) Обухова Тетяна Юріївна, доцент, к.т.н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Основні наближення вольт-амперних характеристик та режимів інжекції.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

1) Пошук та ознайомлення з літературними джерелами за темою практики.

2) Аналіз напівпровідникових властивостей меланіну.

3) Аналіз електрофізичних властивостей пористого кремнію.

4) Математична обробка ВАХ структур пористий кремній/меланін та визначення механізмів провідності.

5) Оформлення звіту, перевірка, захист.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

1) Структура протонного транзистора з органічним польовим ефектом.

2) Зображення SEM виготовленого відбивача Брегга.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника
1	Пошук та ознайомлення з літературними джерелами за темою практики		
2	Аналіз напівпровідникових властивостей меланіну		
3	Аналіз електрофізичних властивостей пористого кремнію		
4	Математична обробка ВАХ структур пористий кремній/меланін та визначення механізмів провідності		
5	Оформлення звіту, перевірка, захист		

Студент

(підпис)

О.В. Тихоненко

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Т.Ю. Обухова

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена електрофізичним властивостям структури меланін/пористий кремній.

Метою роботи є проведення аналізу вольт-амперних характеристик та визначення механізмів переносу заряду. Розглянуто і проаналізовано процеси інжекції і рекомбінації носіїв заряду в напівпровідникових структурах. Диференціальний підхід, заснований на наближенні ВАХ, вводиться з метою розпізнавання механізмів інжекції і рекомбінації фотоелектричних напівпровідникових структур.

Загальний обсяг роботи складає 50 сторінок, кількість ілюстрацій — 20, таблиць — 9, джерел за переліком посилань — 17.

Ключові слова: меланін, еумеланін, пористий кремній, інжекція, вольт-амперні характеристики, сонячні елементи, напівпровідникові структури.

ABSTRACT

Thesis is devoted to the electrophysical properties of the structure of melanin / porous silicon.

The aim of the work is to analyze the current-voltage characteristics and determine the mechanisms of charge transfer. The processes of injection and recombination of charge carriers in semiconductor structures are considered and analyzed. A differential approach based on the $I - V$ curve approximation is introduced to recognize the mechanisms of injection and recombination of photoelectric semiconductor structures.

The total volume of the work is 50 pages, the number of illustrations - 20, tables - 9, sources on the list of references - 17.

Keywords for work: melanin, eumelanin, porous silicon, injection, volt-ampere characteristics, solar cells, semiconductor structures.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
1. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРУКТУРИ МЕЛАНІНУ.....	10
1.1. Класифікація меланінів.....	10
1.2. Оптичні властивості меланіну.....	10
1.3. Електричні Властивості.....	12
1.4. Транспортна модель електричної провідності та фотопровідності в меланіні.....	14
1.5. Біоелектроніка та перспективи на майбутнє.....	16
1.6. Висновки до розділу.....	18
2. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРУКТУРИ ПОРИСТИЙ КРЕМНІЙ.....	20
2.1. Утворення пористого кремнію.....	20
2.2. Вплив пористого шару на ВАХ.....	20
2.3. Сонячні батареї на пористому кремнію.....	21
2.4. Інтегрована оптоелектроніка на основі Por-Si.....	23
2.4.1. Світлодіоди на основі Por-Si	23
2.4.2. Пристрої MEMS на основі Por-Si.....	24
2.4.3. Сенсори на пористому кремнію.....	26
2.5. Висновки до розділу.....	27
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	29
3.1. Інжекційна техніка для дослідження тестових структур сонячних елементів.....	29

3.1.1. Методика аналізу.....	29
3.2. Отримання зразків.....	31
3.2.1. Двохстадійний процес з Ag.....	32
3.2.2. Одностадійний процес з Cu.....	32
3.2.3. МАСЕ процес з Au.....	32
3.2.4. Нанесення меланіну на сонячний елемент та сенсор.....	33
3.3. Результати дослідження.....	34
3.4. Результати диференціального аналізу ВАХ.....	41
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	49

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

УФ – Ультрафіолет

ВАХ – Вольт-амперна характеристика

ЕПР – Електронний парамагнітний резонанс

ЕПЕ – Ефективність перетворення енергії

АР покриття – Антирефлексне покриття

Por-Si – Пористий кремній

Pt – Platinum – Платина

MDAS - Mott–Davis amorphous semiconductor – Аморфний напівпровідник
Мотта-Девіса

OFET - Organic field-effect transistor – Органічний польовий транзистор

MEMS - Microelectromechanical systems – Мікроелектромеханічні системи

SEM - Scanning electron microscope – Скануючий електронний мікроскоп

RCA – Radio Corporation of America – стандарт RCA

ВСТУП

Меланін - це натуральний, дешевий, біологічно сумісний матеріал з унікальними властивостями. Завдяки хорошим оптичним та електричним властивостям, в останні роки меланіни стали потенційним матеріалом для багатьох областей, особливо органічних сонячних батарей, біоприладів та інших новинок, що мають сильне широкосмугове УФ-видиме оптичне поглинання та відносно високу електропровідність, тим самим забезпечив їм важливе місце в органічній напівпровідниковій технології.

В теперішній час спостерігається підвищений інтерес до напівпровідникових матеріалів, які містять нанорозмірні структурні елементи, наявність яких суттєво змінює оптичні, фотоелектричні, електрофізичні та інші властивості напівпровідників. Перспективним матеріалом для сучасної мікро- і нанoeлектроніки є пористий кремній. Виготовлення Por-Si являється не тільки простим, а також забезпечує адаптацію властивостей шару Por-Si відповідно до потреб.

1. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРУКТУРИ МЕЛАНІН

1.1. Класифікація меланінів

Меланіни поділяються на три основних типа: еумеланін, феомеланін і нейромеланін. Більшість природних меланінів є сумішшю еумеланіна і феомеланіна. Завдяки потенційному застосуванню еумеланіна як біоелектронного матеріалу є більше інформації про структуру, оптичні та електричні властивості в літературі ніж у феомеланіну. Нейромеланін виявляється в мозку, його функції до сих пір невідомі.

1.2. Оптичні властивості меланіна

Встановлено, що меланіни є фото-захисними - вони захищають шкіру від шкідливого впливу ультрафіолетового (УФ) та видимого випромінювання. Як результат, дослідження його оптичних властивостей було центром уваги кілька десятиліть. Було показано, що меланін здатний розсіювати 99% поглиненого УФ і видимого випромінювання не радіаційними засобами, що робить його оптимальним фото-захисником.

Меланін також має широкосмуговий, невиразний поглинальний спектр, який поширюється на видимих та УФ ділянках, що простягаються майже в інфрачервоний, при цьому коефіцієнт згасання зменшується експоненціально та монотонно на всій довжині хвилі фотонів (рис. 1.1.). Такий спектр поглинання незвичний для біологічних пігментів, які зазвичай виводять піки на конкретних хвилеподібних числах. Роз'яснювалося, що однаково висока широкосмугова абсорбція, яка спостерігається у меланінів, виникає з кожним компонентом меланіну, який поглинає різну довжину хвилі, що призводить до чистого вимирання в широкому діапазоні (рис. 1.1.). Хоча ця «модель хімічного розладу» може пояснити поглинання широкосмугового зв'язку, тенденція збільшення коефіцієнта поглинання при високих енергіях фотонів недостатньо вивчена.

Запропоновано також співвідношення між розміром частинок та оптичним поглинанням. Було показано, що оптичний спектр еумеланіну демонструє тенденцію, залежну від розміру частинок, з більш сильним коефіцієнтом згасання при більших довжинах хвиль до полімерів з більш високою молекулярною масою. Ця гіпотеза виникла через посилену де-локалізацію електронів або збільшення оптичного розсіювання з більшими розмірами частинок. Роль розсіювання пізніше було спростовано, коли було встановлено, що розсіювання сприяло менше 6% від загального оптичного ослаблення між 210 нм і 800 нм. Вчені також запропонували, щоб абсорбція меланіну слідувала за лінійною тенденцією у всій видимій області, і проявляла експоненціальну тенденцію лише в області 400-500 нм. Спостерігалось, що меланін є люмінесцентним матеріалом під УФ та видимим світлом, однак із надзвичайно слабким сигналом випромінювання [1].

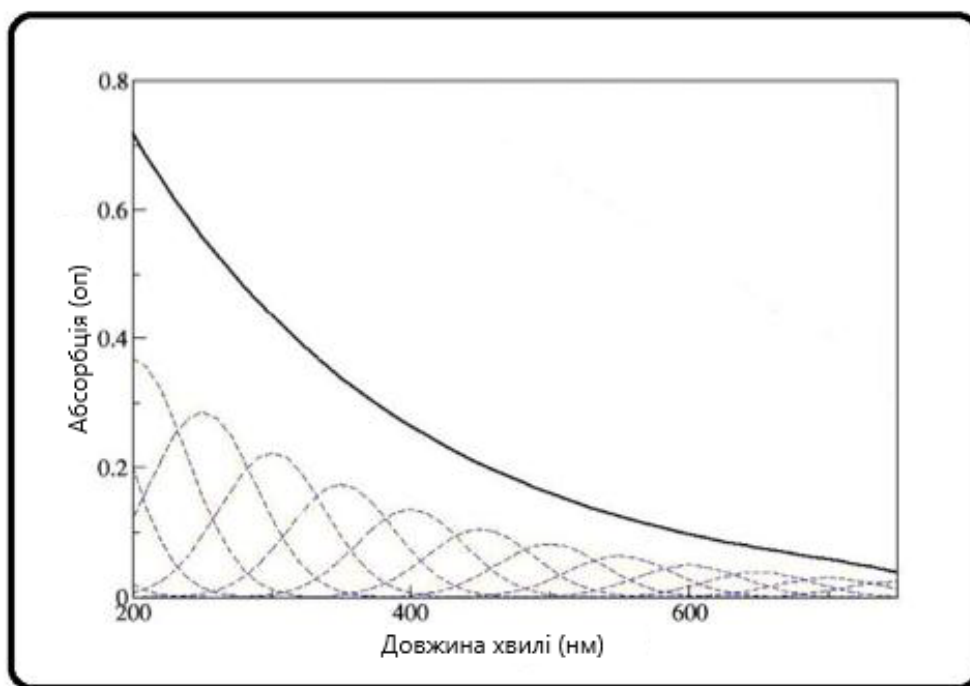


Рис. 1.1. УФ-видимий спектр поглинання меланіну [1]

Широкосмуговий спектр пояснюється тим, що виникає із суміші видів, присутніх в полімерах, включаючи L-3,4-дигідроксифеніланін (L-Dopa), 5,6 дигідроксиіндол-хінон (DHI), 5,6-дигідроксиіндол-2-карбонова кислота

(DHICA), їх окислювально-відновлювальні форми та їх піроли. На рисунку зображено спектр з 15 присутніми видами (пунктирним), які призводять до поглинання широкосмугового зв'язку [1].

1.3. Електричні властивості

Електричні властивості еумеланіну зацікавили вчених з кінця 1960-х. Кілька десятиліть залежні від гідратації електричні властивості еумеланіну в основному інтерпретуються в межах моделі аморфного напівпровідника. Останні роботи підірвали цю парадигму. Вчені досліджували перенос протонного і електронного носія заряду в гідратованому еумеланіні у вигляді тонких плівок. Тонкі плівки є ідеальними кандидатами для цих досліджень, оскільки вони легко доступні для хімічної та морфологічної характеристики та потенційно придатні до застосування в пристроях.

Виміряні ВАХ гідратних тонких плівок еумеланіну з такою конфігурацією електрода (рис.1.2.а) мають об'ємну іонну провідність та міжфазові електрохімічні процеси. Струми при $|U| < 0.2$ В мають ємнісне походження, що впливає із слабкої залежності від напруги та квазілінійної залежності від швидкості розгортки напруги. На $|U| > 0,2$ В, струми показують квазіекспоненціальну залежність від U , що говорить про не ємнісну поведінку. На рис.1.2.б показано додатні гілки перших п'яти циклів ВАХ при найповільнішій швидкості розгортки, $0,5 \text{ мВ с}^{-1}$. Струм зменшується з кожним циклом з плечем вище $0,4$ В. З електрохімічної точки зору, ВАХ припускають наявність незворотніх окислювально-відновлювальних процесів на інтерфейсах Pt / eumelanin (Платина / еумеланін). Зменшення струму з кожним циклом можна віднести до виснаження окисно-відновних форм або утворенням ізолюючого шару на границях розділу електродів. Для подальшого дослідження значення електрохімічних реакцій порівняно з іонною та електронною провідністю в об'ємі, проводилися дослідження масштабування струму з між-електродною відстанню L , товщиною плівки d та площиною електрода A . При цьому

провідність в об'ємній масі повинна масштабуватися з поперечним перерізом плівки ($W \cdot d$) і збільшуватися з $L - 1$, електрохімічні реакції повинні бути більш чутливими до поверхневої області [2]. Результати говорять про те, що процеси на електродах визначають електричний відгук плівки.

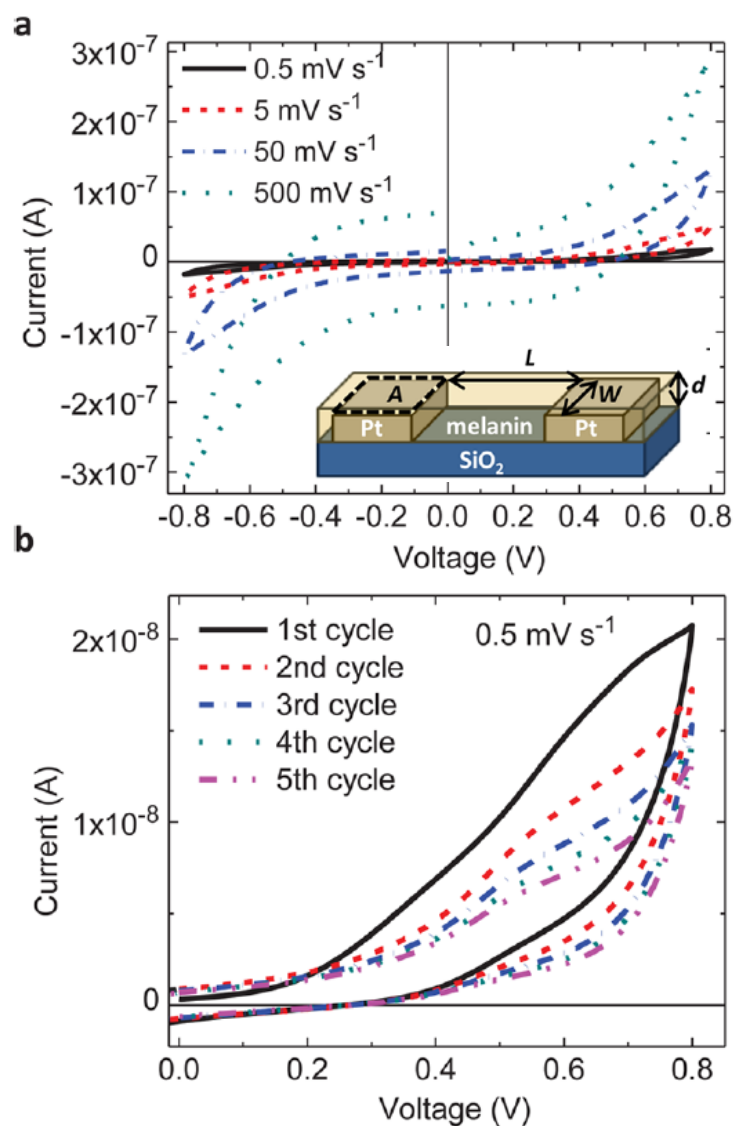


Рис. 1.2. ВАХ плівки еумеланіну ($d = 50$) нм) при відносній вологості 90%, виміряні за допомогою копланарних Pt електродами ($L = 10$ мкм, $W_t = 24,5$ мм). (а) Залежність швидкості розгортки напруги першого циклу. (б) Перші п'ять циклів вимірювання $0,5 \text{ мВ s}^{-1}$ для додатніх напруг [2].

1.4. Транспортна модель електричної провідності та фотопровідності в меланіні

У поєднанні вимірювання постійного струму та фотопровідності, електронно парамагнітні резонанс (ЕПР) дослідження показали, що електричні властивості меланіну походять від мобільних електронів у вигляді напівхінонових радикалів та протонів, вивільнених як наслідок у вигляді реакції рівноваги пропорційності. Поглинута вода по суті титрує систему згідно рис. 1.3. - з цієї причини, Альберт Мостерт та ін. [3] назвали новий механізм "хімічним самодопінгом".

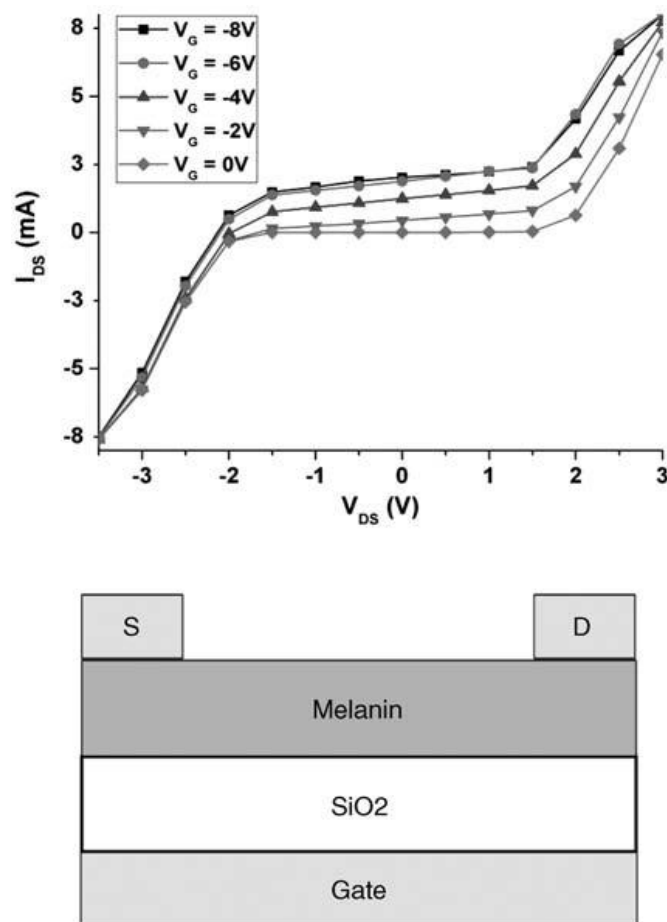


Рис. 1.3. Вольт-амперні характеристики тонкої плівки меланіну [4]

ВАХ тонкої плівки меланіну виміряні за допомогою золотих контактів витоку (S) і стоком (D) в стандартній конфігурації органічного польового

транзистора, як функції напруги на затворі (VG). Криві ВАХ показують суттєвий гістерезис та поведінку блокування електродів що пояснюється тим, що домінуючий носій є іонним (протонним), оскільки металеві контакти не можуть прийняти або вводити протони [4].

Поглинена вода також забезпечує середовище, через яке протони транспортуються крізь матрицю за допомогою так званого механізму Гротгуса (рис. 1.3.), за яким виникає іонний дефект "Перетасування" через мережу, пов'язану з воднем. Це також механізм, відповідальний за транспортування інших гідратних біомакромолекул хітозану, як показав Чао Джун та ін. [5]. Він нещодавно повідомив про: «Біопротонний» польовий транзистор. Дійсно, здається, що протонний компонент транспорту у меланіні є домінуючим у всіх випадках, крім випадків коли матриця повністю зневоднена. Таким чином, ми очікуємо, що провідність матиме активовану форму, а саме

$$\sigma = \frac{A}{T} \exp\left(\frac{E_A}{k_B T}\right), \quad (1)$$

де $\frac{A}{T}$ охоплює центр масової дифузії протонів а експонента описує тунелювання (стрибок), що активується теплом. Крім того, було висунуто припущення, що перехід між суто дифузійним контрольованим переміщенням і переміщенням, де переважають стрибки, то при "стрижку" середовище (наприклад, вода) проникає через систему. Це у випадку меланіну було б еквівалентним ситуації, коли сума поглинутої води достатня для створення безперервного шляху між електродами. У такому випадку провідність швидко збільшується на цьому переході і приймає форму

$$\sigma \propto H^d, \quad (2)$$

де H - гідратація, а d - деякий критичний показник, що відповідає перколяційному фазовому переходу. Остаточний доказ цієї моделі є дуже складним оскільки визначення d з будь-якою точністю, потребує багатьох точок

даних навколо порогу перколяції - це, звичайно, практично неможливо для гігроскопічного органічного провідника, такого як меланін. Тим не менш, схожість між фізикою стрибку позитивного полярона в межах MDAS (Mott–Davis amorphous semiconductor) та протонного стрибка в просочену меланінову мережу, пояснює, чому такий тривалий час панувала парадигма аморфного напівпровідника.

Також, повчально повернутися до спостережень електричних комутацій Гіннеса [7]. Стандартні металеві електроди блокують введення та витягування протонів, значно збільшуючи заряд простору, що, в свою чергу, проявляється гістерезисом в ємності та опорі. В експерименті Гіннеса використовувалися золоті електроди, що продемонстровано на Рис. 1.3. із використанням золотих контактів з тонкою плівкою меланіну в якості провідного каналу в конфігурації польового транзистора [4].

Таким чином, виходячи з усіх наявних на сьогодні доказів, запропонована Мостертом та ін. модель меланіну як гібридний іонно-електронний провідник з так званим шляхом “хімічного самодопінгу” з поглиненої води, здається правдоподібним поясненням для переміщень в цих системах.

1.5. Біоелектроніка та перспективи на майбутнє

Галузі “біоелектроніки” та “наномедицини” стають основними темами в області сучасних матеріалів і біотехнологій. Ці терміни відносяться до створення штучних функціональних електричних елементів, здатних до прямої інтеграції з живими тканинами з метою використання багатьох функцій, таких як стимуляція тканин, їх відновлення або заміна тощо. Вкрай важливо, щоб біоелектронні матеріали повинні бути біосумісні, а біопристрої мати мінімальне енергоспоживання і мати можливість обробляти як іонні, так і електронні сигнали. Біологічні системи в цілому функціонують через потік іонних /

протонних струмів в якості домінуючого шляху перенесення сигналу, а звичайні напівпровідники по своїй суті являються “електронними”. Отже, елементи керування, які можуть виконувати перетворення електронів або одночасно маніпулювати обома типами струму, є центральними в концепції біоелектроніки.

Зокрема, органічні напівпровідники дуже добре підходять для використання як матеріалів прямої електричної взаємодії. Вони володіють багатьма описаними властивостями вище - загалом є більш біосумісними, ніж їх неорганічні аналоги, та крім того, їх детальні хімічні, електричні та поверхневі властивості легко зрозумілі інженерно. Один з перших органічних напівпровідників в області біоелектроніки, це полі 3,4-етилendioкситіофен (PEDOT), легований полістиролсульфонатом (PSS) [7]. Цей матеріал р-типу, але легування PSS з іонами може мати глибокий вплив на його провідність.

Отже, оцінюючи майбутні перспективи для природних провідних матеріалів, таких як меланін, зрозуміло, що біоелектроніка представляє собою основний напрям. Звичайно, основою цього напрямку є вимога зрозуміти основну фізику електричного транспортування в цих системах. Крім того, труднощі в маніпулюванні та обробці матеріалів таких як меланін, ДНК, білки, і т. д. для створення "структури пристроїв" не слід недооцінювати. Розлад на багатьох рівнях, нерозчинність, самоорганізуючі структури більш високого порядку та створення відповідних контактів - лише декілька проблем, з якими стикаються інженери та фізики. Однак ці виклики не є непереборними, як показали нещодавно Чао Джун та ін. [5] з їх біопротонічним польовим транзистором. Інновації в обробці тонких плівок та чітке розуміння структури призвели до створення якісних, повністю функціональних меланінових тонких плівок. З цього часу з'явився перший повністю твердотільний, біоелектронний пристрій на основі меланіну - протонний транзистор з органічним польовим ефектом (OFET) (Рис. 1.4.) справді здатний перетворювати і маніпулювати іонними та електронними струмами.

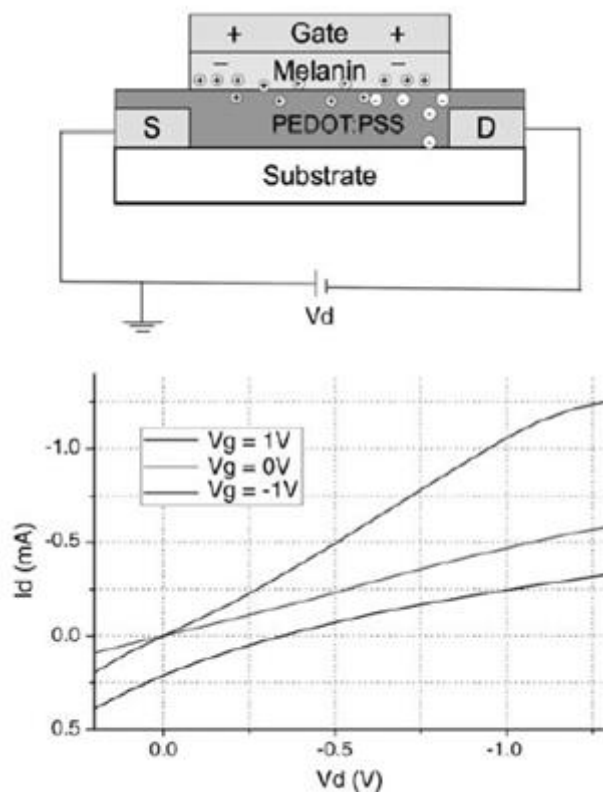


Рис. 1.4. Твердотільний, біоелектронний пристрій на основі меланіну - протонний транзистор з органічним польовим ефектом (OFET) та його ВАХ [4]

Структура OFET (вгорі) показує, як верхній затвор меланіна при відповідному зсуві може вводити протони в канал PEDOT: PSS і керувати його струмом витік-стік. Таким чином, іонні (протонні) струми можна використовувати для управління електронними струмами, а ВАХ показані для напруг затвора 1, 0 і -1 В. Як і очікувалося, канал вимикається при позитивних напругах затвора [4].

1.6. Висновки до розділу

Підводячи підсумок, можна сказати, що розуміння основних оптичних властивостей меланіну є важливо і важливо мати ґрунтовні знання для багатьох застосувань, особливо медичних застосувань. Крім оптичних властивостей важливі також електричні властивості. Еумеланін показує значну електричну і фотопровідність, яка сильно залежить від стану гідратації. Однак, попри

дослідження протягом тривалого часу, є макромолекулярна структура та механізм носія заряду еумеланіну, що недостатньо зрозуміла. Тому дослідження щодо еумеланіну продовжуються, особливо для застосувань у електронних пристроях.

2. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРИСТОГО КРЕМНІЯ

2.1. Утворення пористого кремнію

Пористий кремній утворюється шляхом анодного травлення в флуоридній кислоті. На поверхні кремнію створюється губчаста структура з залишками частинок у нанометровому масштабі. Леман і Гезеле [8] пояснюють це явище квантовим дротяним ефектом, який зупиняє травлення, коли партії досягають квантового розміру. Ті ж квантові ефекти призводять до того, що проміжок у зоні кремнію зміщується до вищих енергій і перетворює кремній з непрямого на квазі прямий напівпровідник. Також процес травлення може бути досягнуто декількома методами, такими як метод іскрової ерозії, гідротермальний, радіочастотне розпилення, травлення та електрохімічне травлення. Останній метод забезпечує безліч переваг, як простота та керованість. Керованість можна отримати за допомогою зміни практичних параметрів, таких як час, склад електроліта і щільність струму. Крім того, Por-Si має більшу площу поверхні порівняно з плоскою пластиною завдяки численним порам. Пориста структура змінює внутрішні властивості, такі як електропровідність.

2.2. Вплив пористого шару на ВАХ

Параметри електрохімічного травлення можуть змінювати значення ВАХ таким чином, що при збільшенні щільності струму, режим випрямлення зменшується. Крім того, електричними властивостями, особливо випрямленням, можна маніпулювати через пористий кремній. Оскільки пористість була визначена ефективною для електричних властивостей, пористий p-n перехід може мати або конструктивне, або руйнівне втручання для випрямлення.

Дослідження проводилося шляхом вимірювання ВАХ як в темних, так і в світлих умовах. В першу чергу, вивчалась поведінка ВАХ в темряві та

освітленості для однорідного зразка. ВАХ вибраного зразка мають типову форму бар'єра Шотткі, який визначає поведінку випрямлення (рис. 2.1. зліва). Це чітко вказує на те, що електричний опір, який перевищує поріг напруги 0,2 спадає до кінцевого значення. Така поведінка очікується у випадку р-n переходу. Як показано у випадку з пористим зразком (рис. 2.1. справа), напруга пробою і струм в прямому зміщенні збільшувались і зменшувались відповідно. Крива темних і світлих умов призводить до зміни випрямлення.

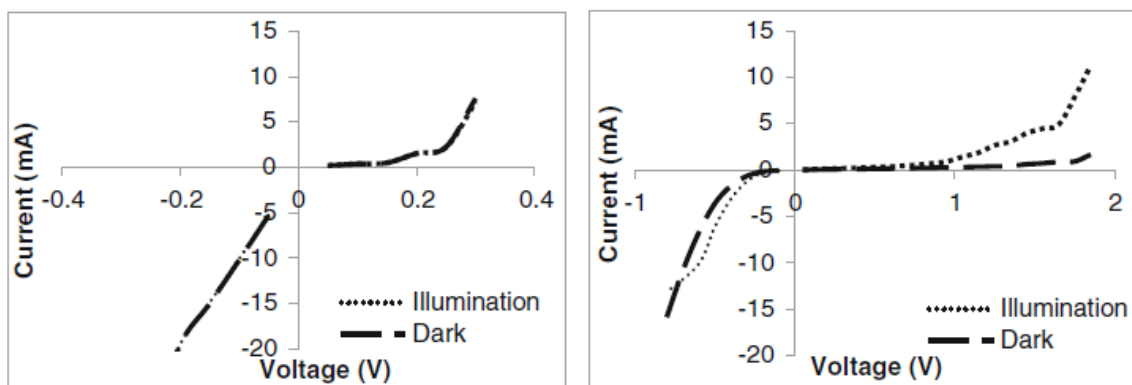


Рис. 2.1. ВАХ виміряні в темряві і освітленні для однорідного зразка (зліва) і пористого (справа) [9].

ВАХ при освітленні, показали інтенсивне випрямлення в запропонованому стику. У темних умовах коефіцієнт ідеальності пористого кремнія становив приблизно 3,9, який порівняно з 4.2 для однорідного зразку демонструє 7% поліпшення. Також була підвищена світлочутливість у пористого зразка. Крім того, світловий відгук пористого зразка становив 0,02. На закінчення, режим випрямлення може бути покращений за допомогою відповідної пористості [9].

2.3. Сонячні батареї на пористому кремнії

Оскільки відбиття світла від поверхні сонячних батарей є одною з основних перешкод, що обмежують їхню роботу, то його потрібно мінімізувати для максимальної ефективності перетворення енергії (ЕПЕ) сонячних елементів.

Коефіцієнт відбиття матеріалу тісно пов'язаний з показником заломлення. В даний час кремній є основним матеріалом, який використовується для комерційного використання сонячних батарей через низьку вартість та сумісність із звичайними процесами напівпровідникових пристроїв. Однак високий показник заломлення Si ($\sim 3,5$), запобігає ефективному виникненню електронно-діркових пар ефективно, тим самим обмежуючи ЕПЕ сонячних елементів Si. Тому дуже важливо зменшити відбивання Si. Антирефлексне (АР) покриття використовується для зменшення поверхневого відбивання, оскільки він збільшує ЕПЕ за рахунок продовження терміну експлуатації носія та покращує електрофізичні властивості фотоелектричних елементів [10]. В даний час АР покриття вивчається в основному з використанням органічних матеріалів, властивості яких дуже мінливі. Отже, треба знайти АР матеріал, сумісний з сонячними елементами на основі Si. Серед кількох матеріалів-кандидатів, привабливим є пористий кремній, завдяки ефективному АР ефекту та додаткових переваг, таких як розширення забороненої зони, широкий оптичний діапазон поглинання, текстурування поверхні [10]. Високий АР ефект Por-Si особливо обумовлений його великою величиною відношення поверхні до об'єму, що можна контролювати, змінюючи пористість. Por-Si також корисний для перетворення високоенергетичного сонячного випромінювання в малоенергетичне світло, яке може більш ефективно поглинатися в об'ємном кремнії [11].

2.4. Інтегрована оптоелектроніка на основі Por-Si

Оптоелектроніка на основі кремнію - це колосальна інновація, яка набирає темп. Очікується, що ця інновація вплине на адекватність витрат і відому ефективність кремнію на електронних схемах, інтегруючи фотонні компоненти в цифрові і бездротові кремнієві інтегральні схеми.

2.4.1. Світлодіоди на основі Por-Si

Por-Si - це матеріал, оптичні властивості якого можуть бути налаштовані під час його формування, і він включає в себе ефект квантового утримання в нанометровому діапазоні. Завдяки чому цей матеріал може бути ефективним для випромінювання світла при кімнатній температурі. Використовуючи Por-Si, були виготовлені світлодіоди і інтегровані в стандартний виробничий процес. Жовто-оранжеве свічення спостерігається неозброєним оком при кімнатній температурі.

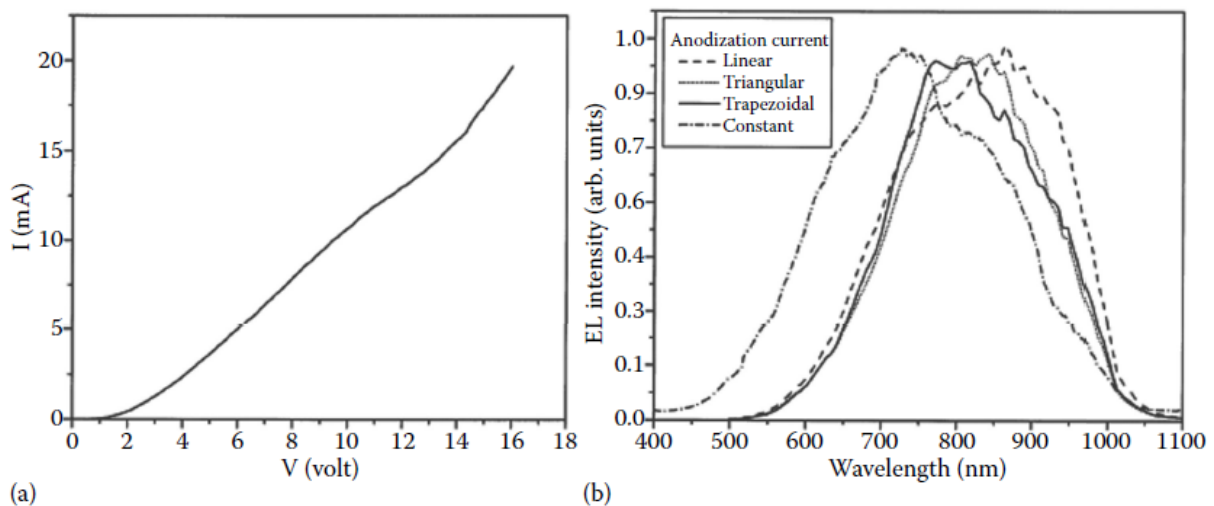


Рис. 2.2. (а) ВАХ світлодіодного пристрою на основі Por-Si, і (б) спектри електролюмінесценції різних світлодіодів, виготовлених з різними формами струму [12].

На рис. 2.2.а зображені типові ВАХ світлодіодів на основі Por-Si. Було помічено обмеження прямого струму, що було пов'язано з високим послідовним опором в світлодіоді. Причиною цього було з'єднання з опором ліній поліконтакта, кристалічної підкладки і шару полікремнію. Були застосовані різні форми сигналів струму анодизації і спостерігалися деякі незвичні характеристики, які показані на рис. 2.2.б. Світлодіод виготовлений при $75 \text{ mA} / \text{cm}^2$ (постійна щільність струму), показав пік випромінювання при 700 nm ; однак пік у 800 nm спостерігався при тій же величині щільності струму (непостійній). Це пов'язано з тим, що застосування постійної щільності струму може дати більш високу пористість, тоді як вона була низькою для випадку застосування не постійної щільності струму [12].

2.4.2. Пристрої MEMS на основі Por-Si

MEMS - це технологія мініатюризації електромеханічних елементів з використанням технології мікрообробки. Інтеграція мікромеханічної фототермічної спектроскопії з відповідним сорбентом може бути виготовлений у мікросхемі з ІЧ-охолоджуючим детектором. MEMS- фототермічна спектроскопія допомагає виявляти мікроелементи за допомогою оптичного MEMS покриття. MEMS-спектрометр для ІЧ-спектроскопії газів з високою роздільною здатністю повинен містити регульоване інфрачервоне джерело. Ця установка корисна для виявлення аналіту парової фази. Фільтр допомагає вимірювати сигнали мікрофототермічного спектрометра для високої роздільної здатності. Було продемонстровано виготовлення фільтру, що регулюється на мікросхемі, на основі еталону MEMS Fabry – Perot з використанням розподілених бреггівських дзеркал Por-Si [13]. PSi на кремнієвій пластині був виготовлений методом електрохімічного травлення. Пористість шару зберігалася шляхом оптимізації щільності струму травлення та інших параметрів електрохімічного травлення. За допомогою цього методу утворювались альтернативні шари з

різними показниками заломлення для отримання відбивача Брегга, як показано на рис. 2.3а. Крім того, інтерферометр Фабрі-Перо на основі PSi був виготовлений з використанням середніх та довгохвильових інфрачервоних областей, які зображені на рис. 2.3б. MEMS у поєднанні з цим виготовленим на основі PSi інтерферометром Фабрі-Перо може добре працювати в якості датчика [15].

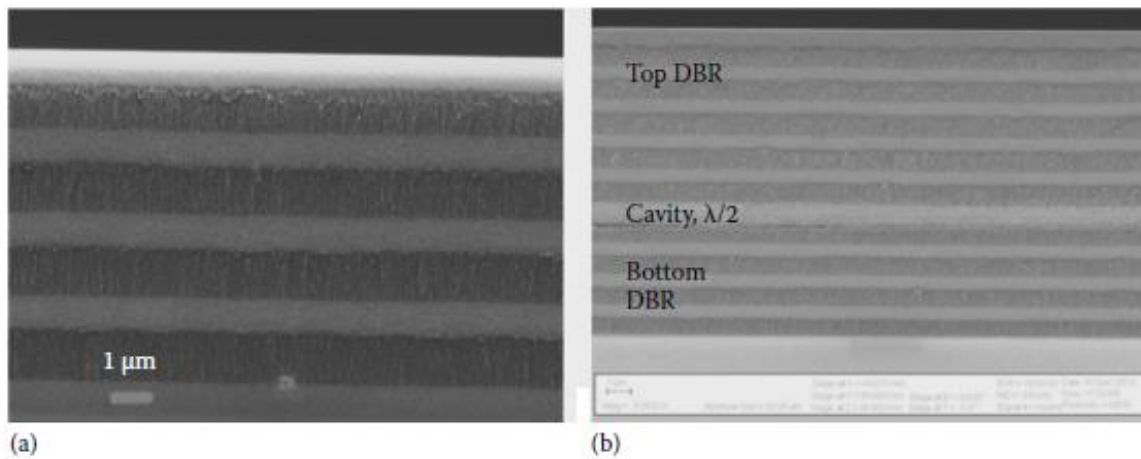


Рис.2.3 а) зображення SEM виготовленого відбивача Брегга та б) порожнину, підготовлену між ними два відбивача Брегга [13].

Пристрої MEMS повинні бути ізольованими від зовнішнього середовища, щоб захистити їх від цього середовища та підтримки низького рівня тиску в комплекті MEMS-пристроїв. Тому, був потрібен геттер(газопоглинач) для підтримки низького тиску в комплекті пристроїв MEMS. Геттер розроблений та виготовлений таким чином, щоб він мав високу пористість для поглинання газів. У цьому контексті Por-Si використовується як геттер для пристроїв MEMS завдяки його високій пористості. Завдяки великій площі поверхні з більшою пористістю, Por-Si допомагає реагувати з газами. Цей газопоглинач Por-Si з порожниною сприяє зменшенню демпфування повітря та паразитної ємності, що підвищує продуктивність резонаторів. Повідомлялося про два типи пристроїв MEMS, де один пристрій був з геттером, а інший без геттера. У першому пристрої з геттером було виготовлено порожнину електрохімічним травленням

кремнієвої підкладки. Однак при електрохімічному травленні виходить товстий шар Por-Si, який виконує роль геттера. Був виготовлений інкапсульований пристрій MEMS з порожниною і Por-Si як геттер [14]. Виготовлений пристрій MEMS з інкапсуляцією перевірено на резонансний профіль за допомогою мережевого аналізатора. Пристрій MEMS з порожниною і Por-Si показав більш високий коефіцієнт добротності, ніж пристрій MEMS з лише порожниною. Пристрій MEMS також був протестований на тиск усередині пристрою, і MEMS-пристрій з порожниною та Por-Si-геттером може показувати більш низький тиск, ніж пристрій MEMS лише з порожниною. Por-Si вступає в реакцію з кисневими газами з утворенням оксидного шару, який буде захоплювати молекули іншого газу; тому в порожнині підтримувався низький тиск. Було помічено, що інкапсульований MEMS-пристрій з порожниною та Por-Si-геттером є захищеним від зовнішнього середовища без будь-якого іншого матеріалу чи іншого способу маскування [15].

2.4.3. Сенсори на пористому кремнії

Por-Si є хорошим електропровідним матеріалом з дуже низькою теплопровідністю, завдяки якій він може використовуватися в якості буферного шару в технології мікрообробки. Цей матеріал показав чудові показники в якості мікросутливих пристроїв. За рахунок губчастим наноструктурам (питома поверхня до $500 \text{ м}^2 / \text{см}^2$), цей матеріал ефективно взаємодіє з декількома хімічними речовинами і біологічними молекулами і діє як перетворювач. Коли цей матеріал піддається впливу хімічних або біологічних речовин, оптичні властивості, такі як показник заломлення, фотолюмінесценція та електрична провідність змінюються, що допомагає пристрою виявити цільовий матеріал. Ключова концепція цього явища відчуття в тому, що коли він піддається впливу хімічних речовин, таких як вуглеводні, ацетон тощо, а також біологічних речовин, показник заломлення Por-Si зміниться. При випробування парової або

рідкої фази через капілярну конденсацію в нанометричних порах він змінює показник заломлення мікрорезонатора Por-Si і, отже, відбувається червоне зміщення спектру відбиття. Для тестування біологічних видів показник заломлення поверні Por-Si викликає коливання внаслідок утворення ковалентного зв'язку [16].

Por-Si вимагає інтеграції декількох пристроїв, таких як хімічні та біосенсиори, хвилеводи, MEMS тощо. Por-Si використовується як хімічний та біологічний чутливий елемент завдяки його морфологія та фізичним властивостям. Використання Por-Si в оптичних сенсорах базується на властивостях фотолюмінесценсії та відбивання, але зазвичай Por-Si має недолік, через який Por-Si не може бути використаний як матеріал для оптичного сенсора, оскільки взаємодія матеріалу датчика з аналітом не є специфічним при впливі газоподібної або рідкої речовини, що ґрунтується на зміні фотонних властивостей. Щоб подолати цю проблему, існує обмеження на модифікацію хімічної або фізичної поверхні гідрованого покриття Por-Si для підвищення селективності датчика для конкретних біохімічних взаємодій. Це може бути зроблено шляхом виготовлення протравленого Por-Si, який має дуже реактивну Si-H кінцеву поверхню. Одношаровий Por-Si, який діє як інтерферометр Фабрі-Перо, є основним перетворювачом в біочутливості. Цей пристрій має високу чутливість до зміни показника заломлення, і було проведено кілька досліджень у взаємодії біомолекул, таких як одно-ланцюгова ДНК, білок, що зв'язує глютамін з кишкової палички [16].

2.5. Висновки до розділу

Підсумовуючи, Por-Si - це універсальний матеріал, який має широке застосування в електроніці, оптоелектроніці, біосенсорах, газових датчиках, акумуляторах та в медичному застосуванні тощо. Технології на основі кремнію

цілком здатна інтегрувати електричні та оптичні компоненти в один чіп. Використовуючи Por-Si, можливо пов'язати кремнієву технологію з оптоелектронними пристроями. Додаючи оптичну функціональність в установленну інфраструктуру виробництва кремнію, можна підвищити продуктивність існуючих мікроелектронних, так і розвиваючих фотонних пристроїв.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Інжекційна техніка для дослідження тестових структур сонячних елементів.

Рекомбінація електронів і дірок у напівпровідниковому матеріалів є одним з найважливіших процесів у фотоелектричних сонячних елементах, що визначає їх фізичні та технічні параметри. Існує багато методик, заснованих на оптичних, термічних, фотоактиваційних та інших явищ для дослідження процесів рекомбінації у фотоелектричних напівпровідниках. Альтернативним підходом до визначення особливостей рекомбінації є метод введення носія заряду. Процеси інжекції відіграють головну роль в механізмі потоку заряду в тонкому напівпровідниковому шару, коли його товщина L коливається між довжиною екранування Дебая і довжиною дифузії носіїв. Механізми інжекції та рекомбінації обох типів носія заряду впливають на форму ВАХ. З іншого боку, аналіз ВАХ дозволяє контролювати параметри бар'єрних напівпровідникових структур, монополярного та біполярного інжекційного, стрибкового, іонного, перколяційного та інших механізмів носіїв заряду. Інжекція носіїв заряду, будучи ще одним способом підвищення концентрацій обох типів носіїв в напівпровідниковій структурі, дозволяє визначити такі фізичні параметри, як тривалість рекомбінації неосновних носіїв, швидкість поверхневої рекомбінації, розподіл локальної щільності станів забороненої зони тощо.

3.1.1. Методика аналізу

Аналіз механізмів інжекції та рекомбінації обох носіїв заряду встановлює суттєву різноманітність у поведінці інжекційних носіїв та їх впливу на ВАХ. У таблиці 1, описано основні наближення ВАХ напівпровідникових структур, які доступні та застосовані в сонячних елементах, а також модельну класифікацію режимів інжекції та рекомбінації, що мають місце у випробувальних комірках, залежно від умов експлуатації.

Таблиця 1. Основні наближення ВАХ та режимів інжекції і рекомбінації [17]

Значення α	Апроксимаційні рівняння для ВАХ	Номер формули	Режим інжекції і рекомбінації
$0 < \alpha < 1 \text{ min}$	$j(U) = e\mu_n n_K \frac{U \exp\{\frac{\varepsilon e d_K U}{\varepsilon_K k T L}\}}{1 + \frac{2\mu_n U}{u_n D_K L}}$	3	Режим постійного поля між контактами
$\alpha = 1$	$j(U) = e\mu_n n_0 \frac{U}{L}$	4	Закон Ома
$\alpha = 1$	$j(U) = e\mu_n n_K \frac{(U - U_K)}{L}$	5	Струм обмежений контактами
$0 < \alpha < 1.5 \text{ min}$	$U(j) = \left[1 - \frac{j}{j_i}\right] \frac{jL}{\sigma}$	6	Режим низької інжекції
$\alpha = 1.5$	$j(U) = \frac{8}{9} e \left[\frac{2\mu_n \mu_p (\mu_n + \mu_p)}{\gamma_z} \right]^{0.5} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{L^2}$	7	Подвійна інжекція в напівпровіднику, біомолекулярна рекомбінація
$\alpha = 2$	$j(U) = \frac{9 \varepsilon \mu_n U^2}{8 L^3}$	8	Монополярна інжекція в напівпровідник або діелектрик без пасток
$\alpha = 2$	$j(U) = \frac{9 \varepsilon \mu_n U^2}{8 \theta L^3}$	9	Монополярна інжекція в напівпровіднику або діелектрику з пастками
$\alpha = 2$	$j(U) = \frac{3}{4} \left[\frac{\pi \varepsilon \mu_n \mu_p (\mu_n + \mu_p)}{\gamma_z} \right]^{0.5} \frac{U^2}{L^3}$	10	Подвійна інжекція в ідеальний діелектрик, біомолекулярна рекомбінація
$\alpha = 2$	$j(U) = \frac{9}{8} e \mu_n \mu_p \left[\frac{(\gamma_n + \gamma_p)}{\gamma_n \gamma_p N_r} \right] \Delta N \frac{U^2}{L^3}$	11	Подвійна інжекція в напівпровідник, мономолекулярна рекомбінація
$\alpha > 2 \text{ max}$	-	12	Монополярна інжекція або подвійна інжекція
$\alpha = 3$	$j(U) = \frac{125}{72\pi} e \mu_n n_p \gamma_n \frac{U^3}{L^5}$	13	Подвійна інжекція в ідеальний діелектрик, монополярна рекомбінація
	$j(U) = \frac{21609}{131072\pi^2} \frac{eh^6}{(\gamma_z E_g)^3} *$	14	Надвисока подвійна інжекція
$\alpha = 3$	$* \left[\frac{\mu_n \mu_p (m_n + m_p)}{m_n m_p} \right]^{0.5} \frac{1}{(\mu_n + \mu_p)} \frac{U^4}{L^7}$		

З метою розпізнавання вище зазначених режимів та механізмів інжекції і рекомбінація в тестовій структурі сонячних елементів, може бути введений диференційний метод для обробки експериментальних ВАХ. Цей метод диференційного аналізу залежності $y = f(x)$ (де x є аргументом, y – функція) передбачає математичне визначення безрозмірних значень у формі:

$$\alpha(x) = \frac{d(\lg y)}{d(\lg x)} = \frac{x}{y} \frac{dy}{dx}, \quad (15)$$

$$\gamma(x) = \frac{d(\lg \alpha)}{d(\lg x)} = \frac{x}{\alpha} \frac{d\alpha}{dx}, \quad (16)$$

Тут перше значення характеризує степеневу залежність у вигляді $y(x) = x^\alpha$; і друге - експоненціальний закон у формі $y(x) = \exp(x^\gamma)$.

Стандартна процедура дослідження структури сонячного елемента така:

- (1) Експериментальні вимірювання стійкого стану ВАХ тестового зразка в темряві і під освітленням, при прямому і зворотньому зміщенні;
- (2) Математична обробка кривої ВАХ диференційною технікою;
- (3) Аналіз тонкої структури струму в ВАХ та визначення діапазонів сталості та екстримальних значень $(\alpha_{min}, \alpha_{max})$ для α — V залежності відносно напруги;
- (4) Визнання основних режимів інжекції і рекомбінації та визначення їх основних фізичних параметрів випробувальної структури методом інжекції.

Більш докладно про методику за посиланням [17].

3.2. Отримання зразків

У роботі використовувалися кремнієві пластини n-типу і р-типу (100) з питомим опором $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Підготовчий процес очищення пластин складався з трьох стандартних етапів RCA Clean - очищення в розчині піраньї (видалення

органічних і неорганічних забруднень) , RCA-1 (очищення частинок) і RCA-2 (видалення забруднень металу). Кожен етап завершувався промиванням в деіонізованій воді і сушінням на центрифугі. Пластини піддавали техніці MACE (метод хімічного травлення за допомогою металу) відразу після очищення.

У цій роботі застосовувалися три методи MACE - двохстадійний процес з наночастинками Ag, одностадійний процес з наночастинками Cu і травлення попередньо синтезованими наночастинками Au.

3.2.1. Двохстадійний процес з Ag

На першому етапі наночастинки срібла хімічно осаджувалися з розчину нітрату срібла: 0,005 M AgNO_3 : 4,5 M HF. Кремнієві пластини занурювали в приготований розчин на 10 с при кімнатній температурі.

На другому етапі травлення кремнію проводилось з використанням 0,2M розчину H_2O_2 :4,8M HF. Час травлення кремнію 30 хв. Потім пластини промивали в деіонізованій воді і сушили на центрифугі.

3.2.2. Одностадійний процес з Cu

Для одностадійного процесу MACE був приготований розчин на основі нанопорошків нітрату міді, подібний розчину нітрату срібла, але містить перекис водню (як для розчину другій стадії). Пропорції були наступними: 0,005M Cu (NO_3)₂:0,2M H_2O_2 :4,8M HF. Час травлення в кремнії 30 та 50 хвилин.

3.2.3. MACE процес з Au

Наночастинки Au розміром 40-60 нм попередньо отримували хімічним синтезом з цитрату золота. Розчин з частинками золота наносився на поверхню кремнію і висушується на повітрі.

Кремнієве травлення проводилося в тому ж розчині, що і для процесу з наночастинками срібла ($0,2\text{M H}_2\text{O}_2$: $4,8\text{ M HF}$), але час травлення було зміщено до 40-60 хв через більш повільних процесів травлення.

3.2.4. Нанесення меланіну на сонячний елемент та сенсор

Для нанесення датчика, точкові контакти з струмопровідної пасти наносилися на поверхню на відстані 5-10 мм (рис. 3.1. (а)).

Осадження тонкої плівки оксиду індію-олова на лицьовій стороні сонячного елемента здійснювали методом магнетронного розпилення мішені In: Sn (92,5: 7,5). Передні точкові контакти були зроблені з струмопровідної пасти. Алюмінієвий задній контакт був сформований радіочастотним магнетроном. Отримана структура представлена на рис. 3.1. (б).

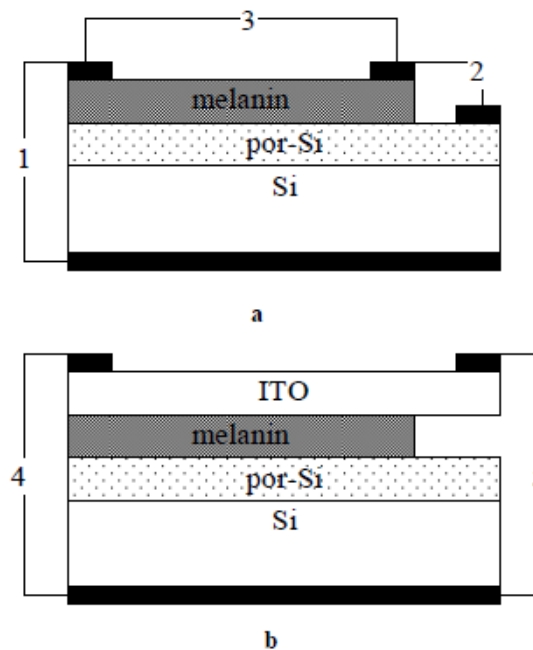


Рис. 3.1. Структура сенсора (а) ((1) - схема вимірювання Si / por-Si / меланін, (2) - por-Si / меланін, (3) - меланін / меланін) і структура сонячного елемента (б) ((4) - схема вимірювання з меланіном, (5) - без меланіну).

3.3. Результати досліджень

Досліджувані зразки:

1. Au 60 нм: 40 хв ; 50 хв ; 60 хв.
2. Au 40 нм: 40 хв; 60 хв.
3. Ag 10 с. 30 хв
4. Cu long: 30 хв; 50 хв.
5. Cu fast: 30 хв; 50 хв.

Зразок № 1: Au 60 нм: 40 хв ; 50 хв ; 60 хв.

Таблиця 2.1. Значення прямої гілки ВАХ та їх похідна досліджуваного зразка Au 60 нм: 40 хв; 50 хв; 60 хв

40 хв			50 хв			60 хв		
U, В	I, мкА	$y', 10^{-6}$	U, В	I, мкА	$y', 10^{-6}$	U, В	I, мкА	$y', 10^{-6}$
1	3,2	38	1	36,3	112	1	0,3	-7,2
2	14,8	17	2	293	348	2	0,9	3
3	43,7	21	3	703	496	3	1,9	3,2
4	84,3	47	4	1220	569	4	5,3	3,3
5	138,3	88	5	1850	580	5	12,5	10,9
6	263	141	6	2420	542	6	32,8	34,4
7	406	198	7	2850	468	7	87,6	82
8	661	256	8	3340	371	8	211	162
9	942	310	9	3640	265	9	424	283
10	1267	354	10	3850	163	10	791	452

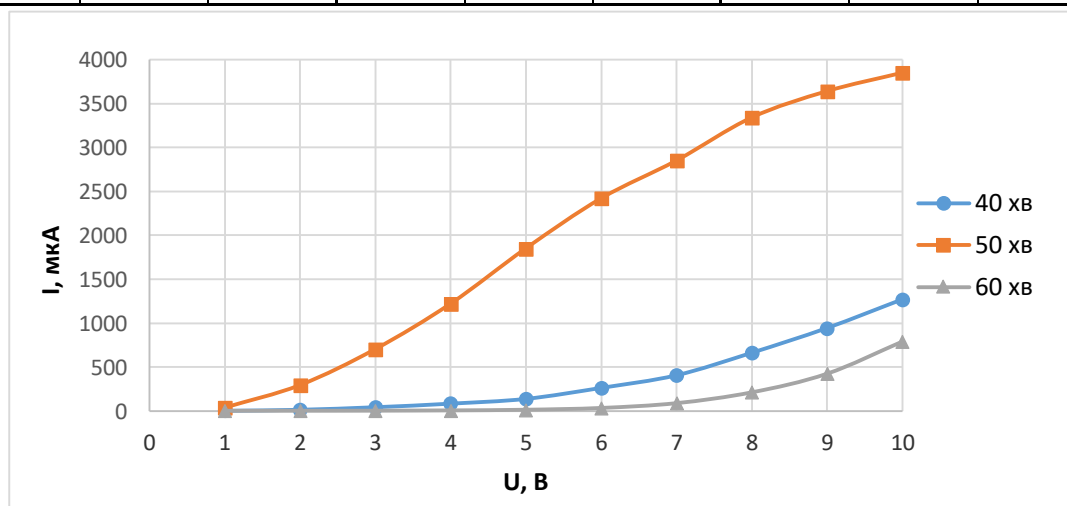


Рис. 3.2. Прямая гілка ВАХ досліджуваного зразка Au 60 нм.

Таблиця 2.2. Значення зворотної гілки ВАХ та їх похідна досліджуваного зразка Au 60 нм: 40 хв; 50 хв; 60 хв

40 хв			50 хв			60 хв		
U, В	I, мкА	$y', 10^{-6}$	U, В	I, мкА	$y', 10^{-6}$	U, В	I, мкА	$y', 10^{-6}$
1	-0,5	-1,1	1	-0,08	5,3	1	-0,1	-6,8
2	-2,3	-4,8	2	-12,3	-14	2	-0,5	-0,35
3	-9,2	-9,2	3	-24,4	-26,7	3	-1,6	-0,82
4	-24,2	-14,1	4	-53,8	-33	4	-4,5	-1,7
5	-38,7	-19,2	5	-99,5	-34,4	5	-7,2	-6,5
6	-58,6	-24,6	6	-122,3	-31,8	6	-11,7	-11,9
7	-84,3	-29,9	7	-156,7	-26,3	7	-28,4	-16,5
8	-127,2	-35,1	8	-178	-19,1	8	-51,6	-18,6
9	-153,7	-40	9	-192	-11,1	9	-63,5	-16,7
10	-201	-44,3	10	-201	-3,5	10	-79,4	-9,3

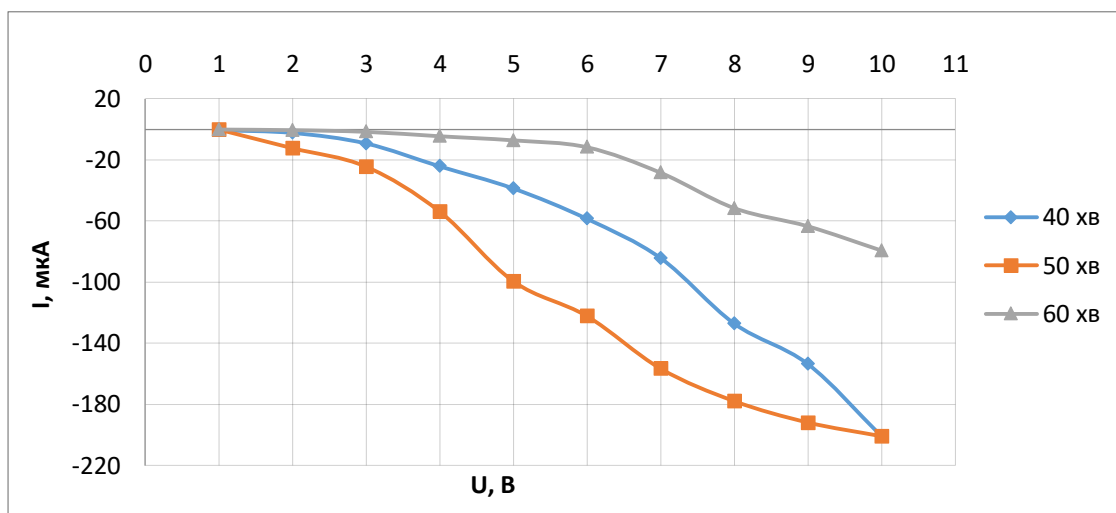


Рис. 3.3. Зворотня гілка ВАХ досліджуваного зразка Au 60 нм.

Зразок № 2: Au 40 нм: 40 хв; 60 хв.

Таблиця 2.3. Значення прямої гілки ВАХ та їх похідна досліджуваного зразка Au 40 нм: 40 хв; 60 хв

40 хв			60 хв		
U, В	I, мкА	$\gamma', 10^{-6}$	U, В	I, мкА	$\gamma', 10^{-6}$
1	0,3	9,1	1	1	9,9
2	1,6	4,2	2	2,7	3
3	4,6	0,5	3	5,1	3
4	7,7	2,2	4	16,3	13
5	22,4	13,8	5	42,3	36,9
6	46,7	39,4	6	98,6	77
7	85,9	83,4	7	198	136
8	206	150	8	354	219
9	427	243	9	670	328
10	706	368	10	1034	465

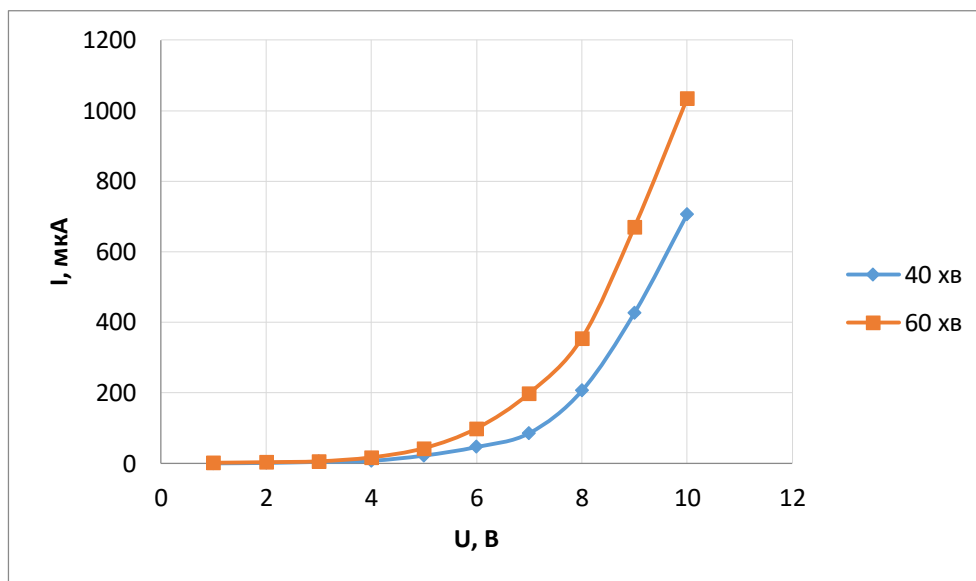


Рис. 3.4. Прямая гілка ВАХ досліджуваного зразка Au 40 нм.

Таблиця 2.4. Значення зворотної гілки ВАХ та їх похідна досліджуваного зразка
Au 40 нм: 40 хв; 60 хв

40 хв			60 хв		
U, В	I, мкА	$y', 10^{-6}$	U, В	I, мкА	$y', 10^{-6}$
1	0	0,8	1	-1,9	-15,9
2	0	-0,04	2	-17,9	-37,5
3	0	-0,2	3	-71,7	-46,1
4	0	-0,11	4	-121,3	-45,6
5	0	0,16	5	-164,5	-39,9
6	0	0,29	6	-183	-33
7	0	0,02	7	-226	-28,7
8	-0,1	-0,9	8	-259	-30
9	-1,6	-2,8	9	-292	-43,7
10	-6,3	-5,9	10	-346	-70,8

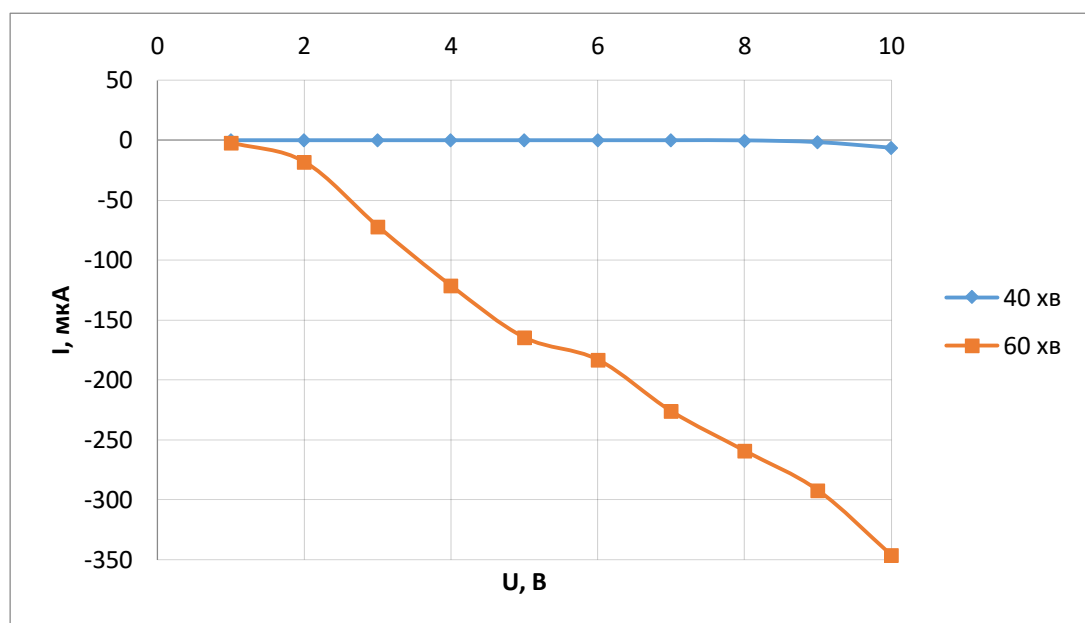


Рис. 3.5. Зворотня гілка ВАХ досліджуваного зразка Au 40 нм.

Зразок № 3: Ag 10 с. 30 хв

Таблиця 2.5. Значення ВАХ та їх похідна досліджуваного зразка Ag

U В	I мкА	$y', 10^{-6}$
-10	-4880	-301
-9	-4810	41
-8	-4680	300
-7	-4510	485
-6	-4040	605
-5	-3720	670
-4	-2820	689
-3	-1420	672
-2	-362	629
-1	-18,9	569
1	10,5	436
2	155,6	382
3	753	350
4	1487	349
5	2190	389
6	2670	478
7	3140	628
8	3640	846
9	4340	1100
10	5940	1500

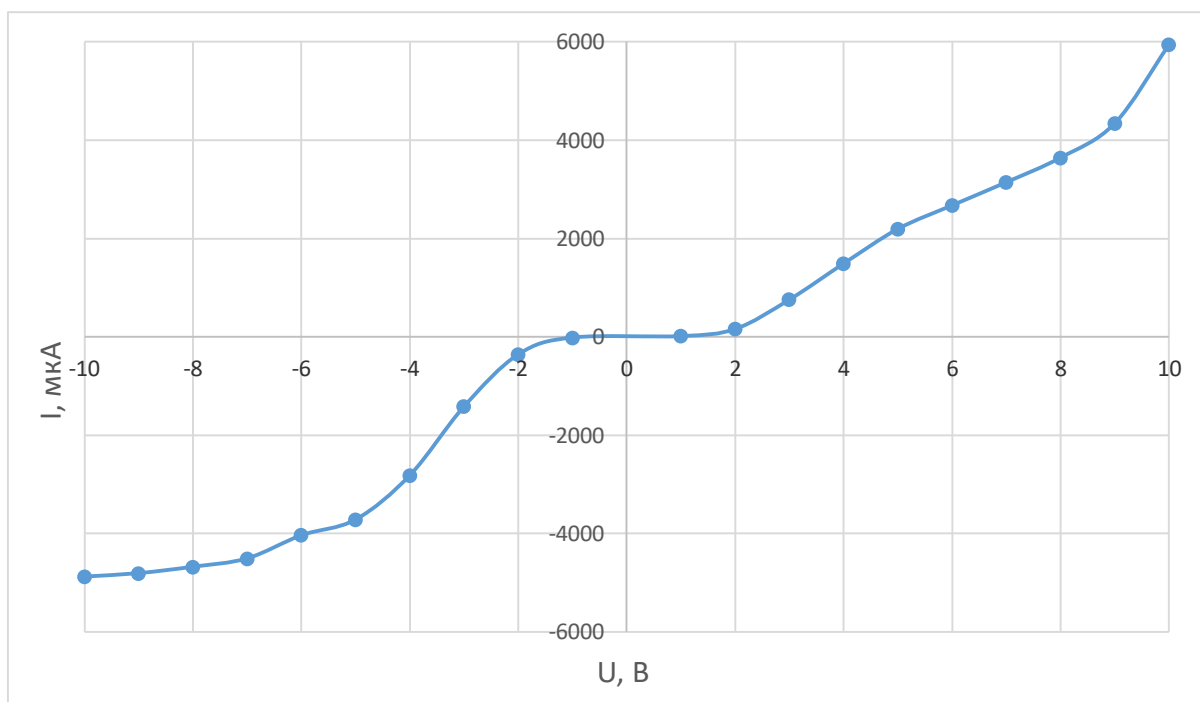


Рис. 3.6. ВАХ досліджуваного зразка Ag 10 с. 30 хв.

Зразок № 4: Cu long: 30 хв; 50 хв.

Таблиця 2.6. Значення ВАХ та їх похідна досліджуваного зразка Cu long: 30 хв; 50 хв

30 хв			50 хв		
U В	I мкА	$y', 10^{-6}$	U В	I мкА	$y', 10^{-6}$
-10	-89,3	35,7	-10	-318	54,1
-9	-40,4	25,6	-9	-285	49,3
-8	-29,7	17,4	-8	-235	44,4
-7	-13,3	10,9	-7	-205	39,7
-6	-12,1	5,9	-6	-166,2	35,3
-5	-8,4	2,4	-5	-109,5	31,5
-4	-4,7	2,7	-4	-74,4	28,6
-3	-1,7	-0,74	-3	-41,3	26,6
-2	-0,7	-0,7	-2	-12,6	25,8
-1	-0,2	0,24	-1	-1,9	26,5
1	0,8	4,3	1	7,4	32,9
2	3,4	7,3	2	43,7	39
3	12,6	10,6	3	112,6	47,4
4	28,2	14,2	4	203	58,3
5	45,8	17,9	5	290	71,9
6	67,2	21,6	6	347	88,3
7	85,9	25,2	7	429	107
8	118,3	28,5	8	528	130
9	129,5	31,4	9	639	157
10	184	33,8	10	887	187

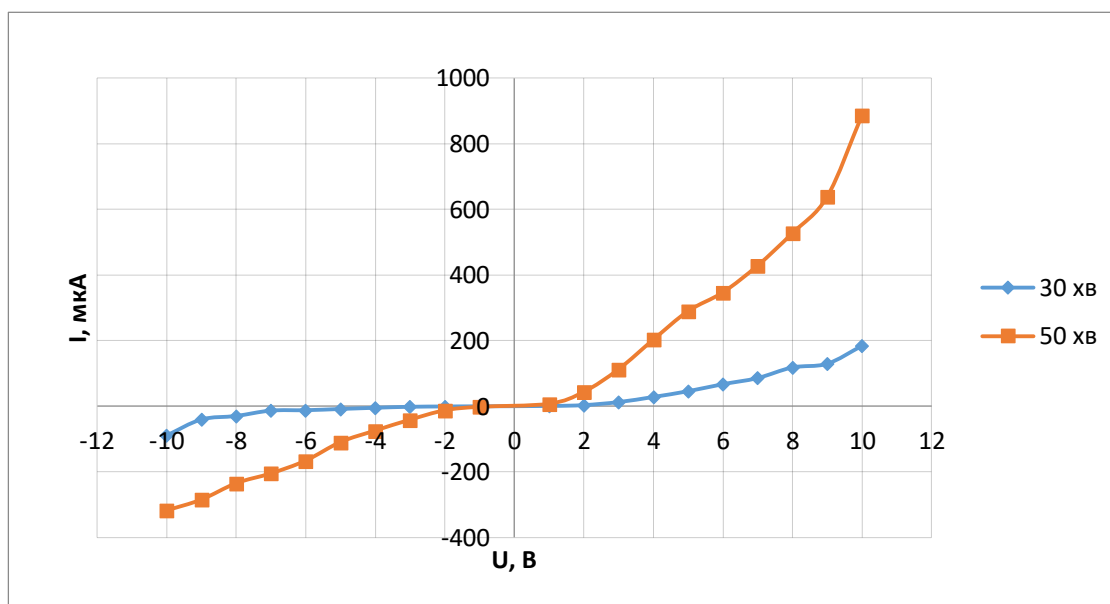


Рис. 3.7. ВАХ досліджуваного зразка Cu long: 30 хв; 50 хв.

Зразок № 4: Cu fast: 30 хв; 50 хв.

Таблиця 2.7. Значення ВАХ та їх похідна досліджуваного зразка Cu fast: 30 хв; 50 хв

30 хв			50 хв		
U В	I мкА	$y', 10^{-6}$	U В	I мкА	$y', 10^{-6}$
-10	-137,4	54,2	-10	-44,8	19
-9	-102,8	42,2	-9	-38,6	12,4
-8	-44,6	31,1	-8	-35	7,3
-7	-22	21,2	-7	-32	3,5
-6	-11,4	12,7	-6	-23,7	1,1
-5	-7,8	5,8	-5	-16,7	-0,04
-4	-4,5	0,7	-4	-13,2	0,03
-3	-2,4	-2,3	-3	-9	1,3
-2	-1,1	-3,3	-2	-3,4	3,8
-1	-0,3	-1,9	-1	-0,5	7,4
1	1,2	8,7	1	0,8	17,9
2	7,5	18,4	2	9,1	24,8
3	31,2	31,3	3	44,3	32,6
4	74,5	47,5	4	104,3	41,5
5	130,4	67,3	5	163,2	51,2
6	223	90,8	6	236	61,9
7	331	118	7	271	73,4
8	451	150	8	343	85,8
9	581	186	9	421	99
10	843	226	10	561	112

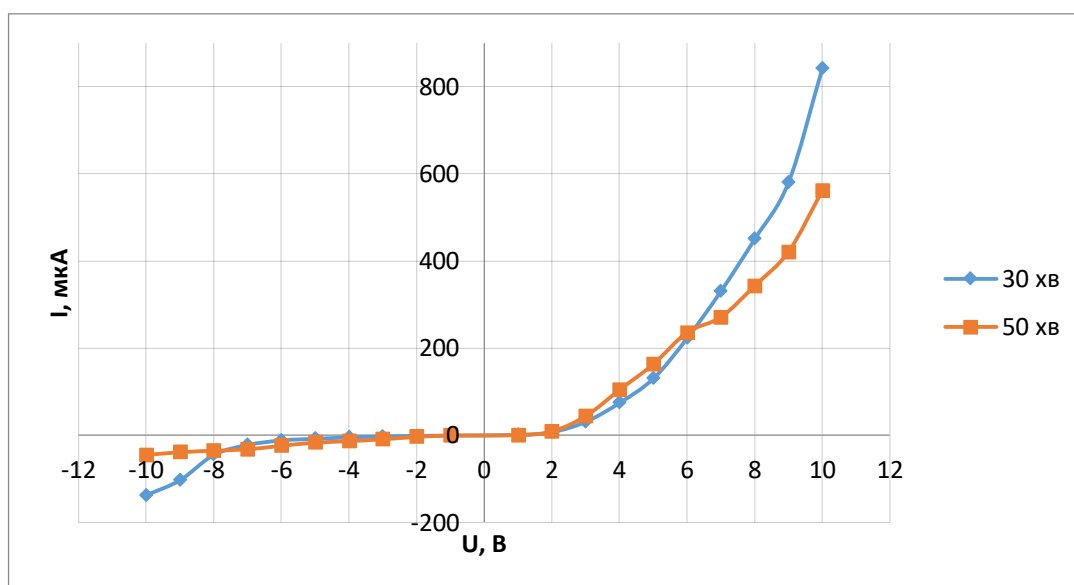


Рис. 3.8. ВАХ досліджуваного зразка Cu fast: 30 хв; 50 хв.

3.4. Результати диференціального аналізу ВАХ

Дивлячись на рис. 3.8. та рис. 3.9. можна сказати, що вольт-амперні характеристики мають експоненціальний характер ($y = y_0 + A_1 e^{\frac{x}{f_1}}$), який відповідає формулі (4). Та враховуючи діапазони зміни кривих для характеристик α — V для цих зразків, можна говорити про режим постійного поля між контактами.

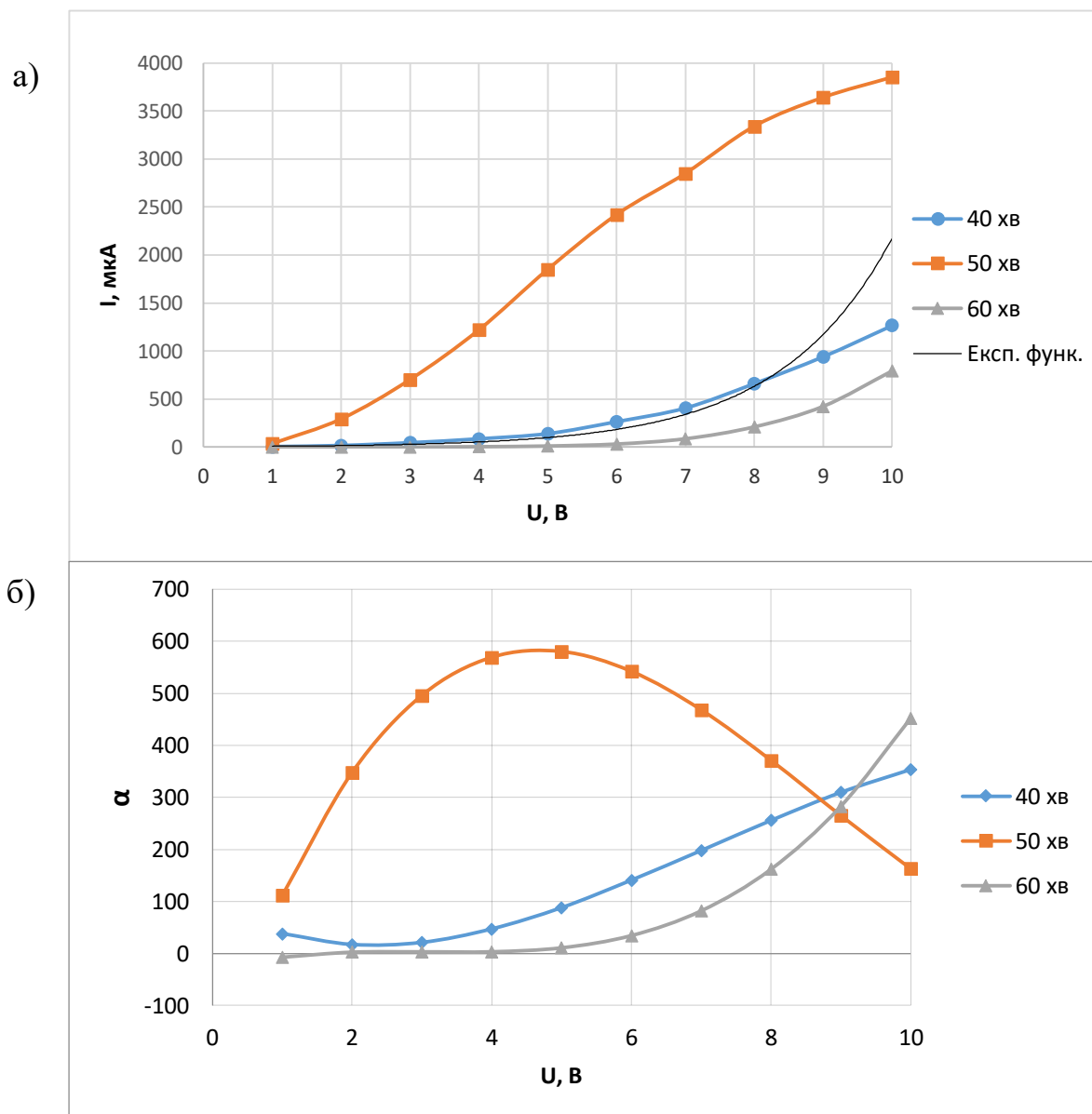
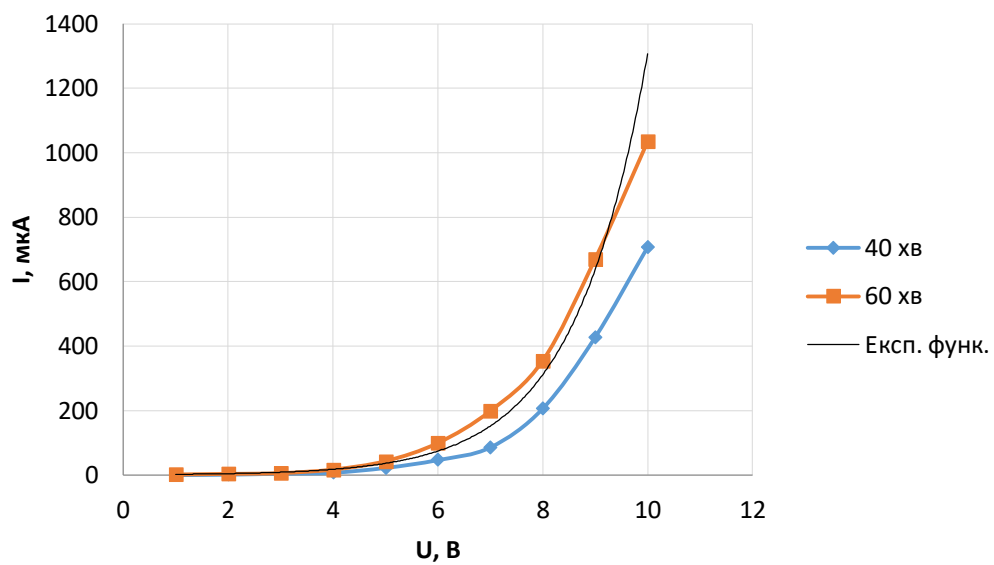


Рис. 3.9. (а) ВАХ досліджуваного зразка Au 60 нм: 40 хв; 50 хв; 60 хв. Та її похідна (б)

а)



б)

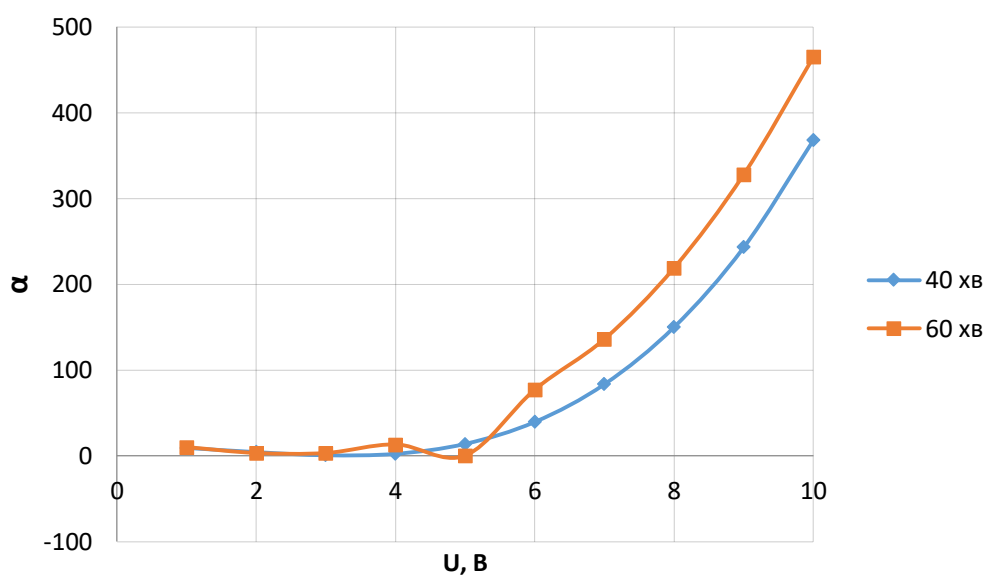


Рис. 3.10. (а) ВАХ досліджуваного зразка Au 40 нм: 40 хв; 60 хв. Та її похідна (б)

Для зразка Ag 10 с. 30 хв. вид вольт-амперні характеристики наближається до логістичної функції ($y = \frac{A_1 - A_2}{1 + (x/x_0)^p} + A_2$), який відповідає формулі (6), що вказує на режим слабкої інжекції.

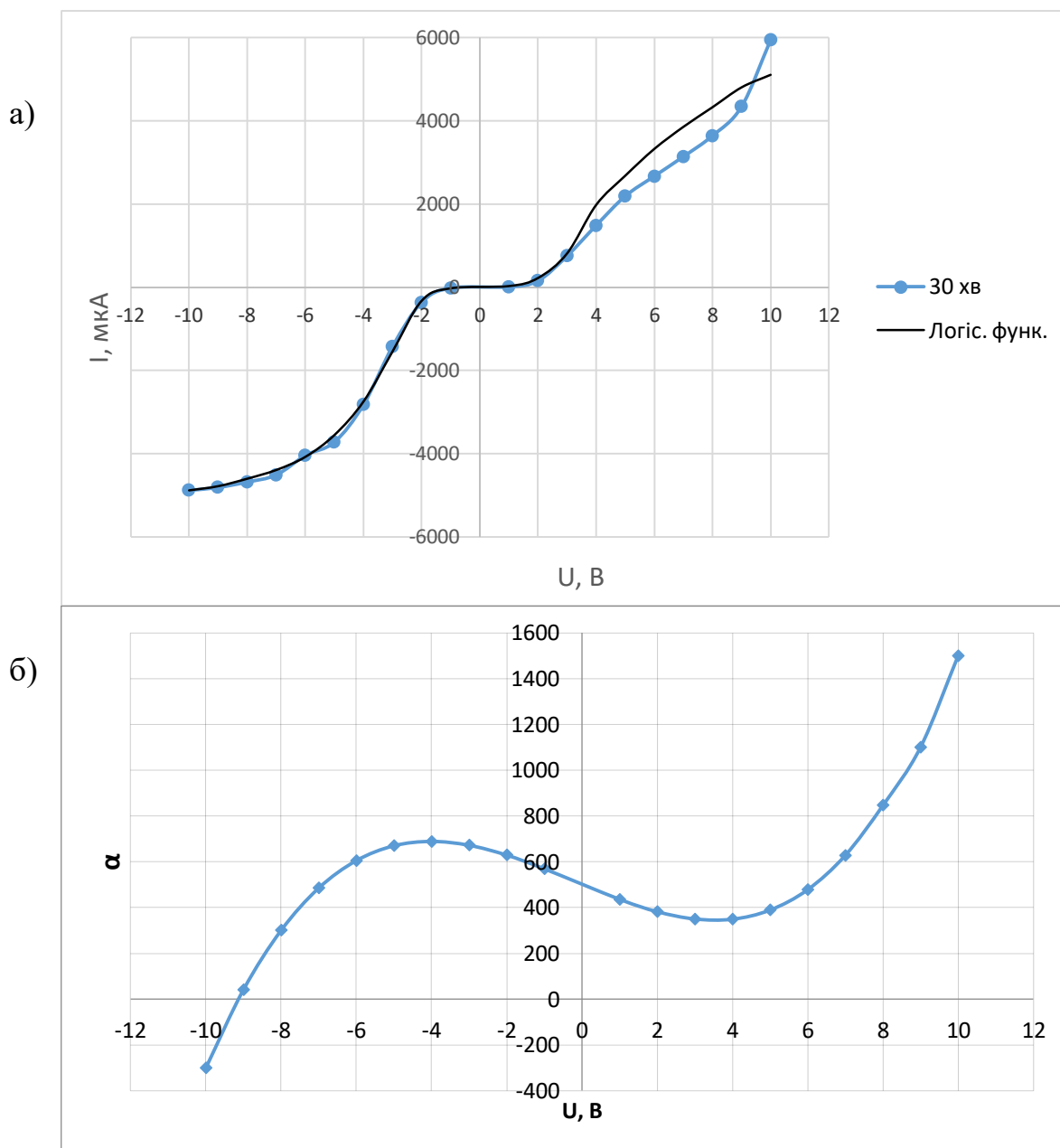


Рис. 3.11. (а) ВАХ досліджуваного зразка Ag 10 с. 30 хв. Та її похідна (б)

Дивлячись на рис. 3.11. та рис. 3.12. можна сказати, що вольт-амперні характеристики мають степеневий характер ($y = x^A$) які відповідають формулам (10-14), що в поєднанні з діапазонами зміни кривих для характеристик α — V для цих зразків вказує на механізм подвійної інжекції в напівпровідник.

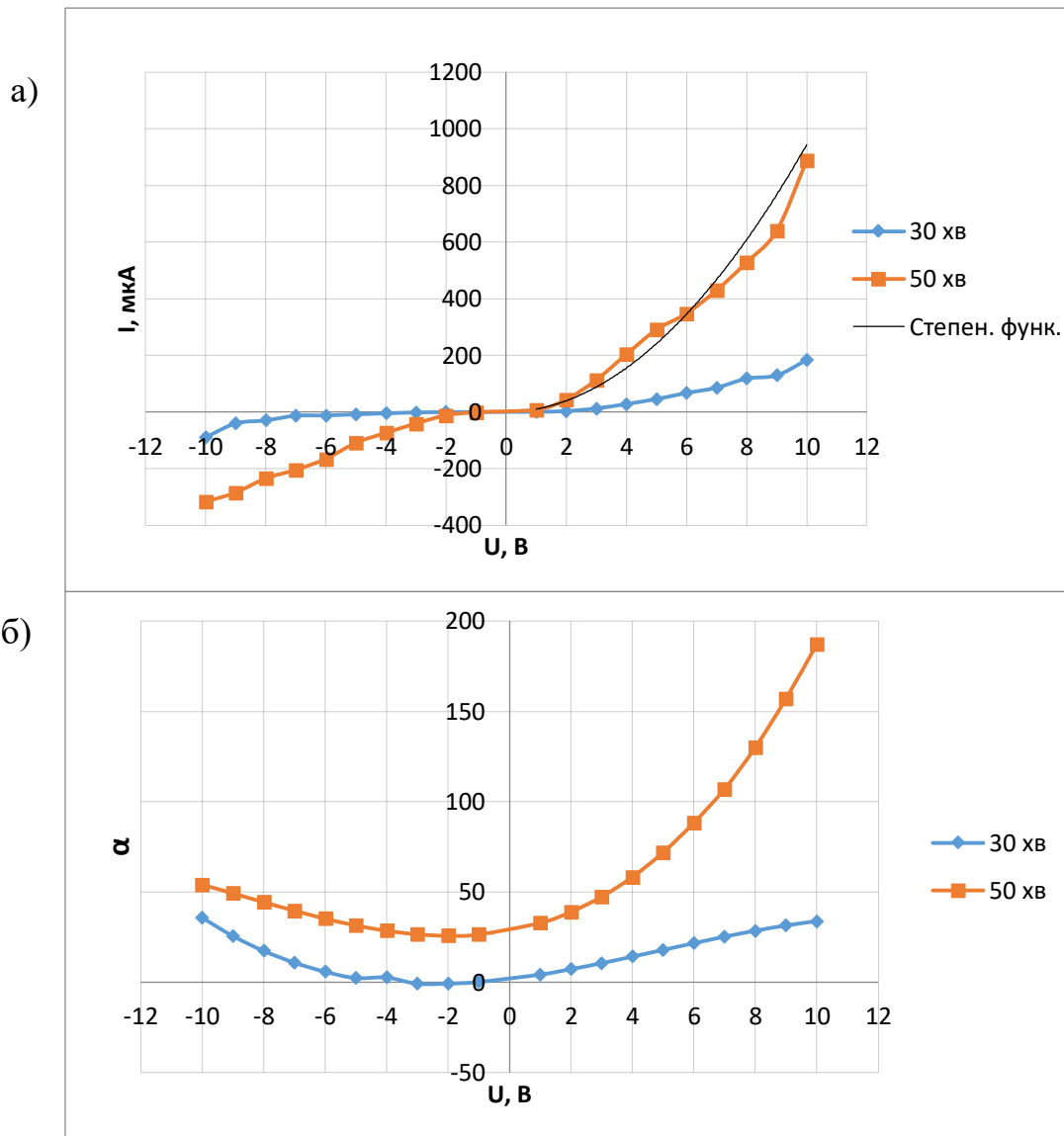


Рис. 3.12. (а) ВАХ досліджуваного зразка Cu long: 30 хв; 50 хв. Та її похідна

(б)

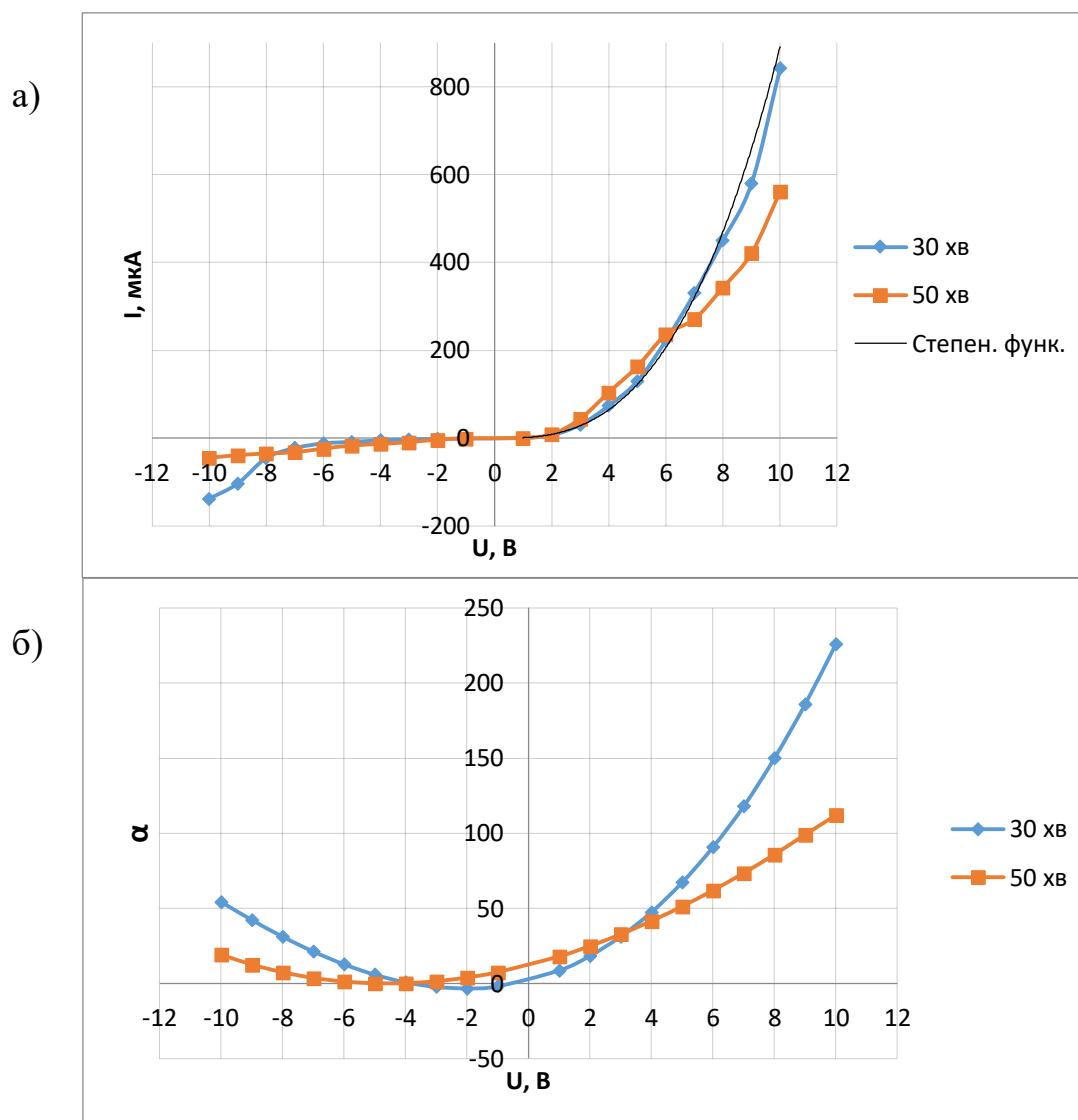


Рис. 3.13. (а) ВАХ досліджуваного зразка Cu fast: 30 хв; 50 хв. Та її похідна (б)

Тож підсумуємо все в таблицю:

Таблиця 2.8. Результати

Зразок	Апроксимаційні рівняння для ВАХ	Діапазон значень похідної, 10^{-6}	Механізми переносу заряду
Au 60 нм 40 хв	$y = y_0 + A_1 e^{\frac{x}{f_1}}$	47 — 354	Режим постійного поля
Au 60 нм 50 хв	$y = y_0 + A_1 e^{\frac{x}{f_1}}$	496 — 580	Режим постійного поля
Au 60 нм 60 хв	$y = y_0 + A_1 e^{\frac{x}{f_1}}$	3.3 — 34.4	Режим постійного поля

Au 40 нм 40 хв	$y = y_0 + A_1 e^{\frac{x}{f_1}}$	13 — 34.9	Режим постійного поля
Au 40 нм 60 хв	$y = y_0 + A_1 e^{\frac{x}{f_1}}$	3 — 77	Режим постійного поля
Ag 10 с 30 хв	$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + (x/x_0)^p} + A_2$	349 — 689	Режим низької інжекції
Cu 30 хв long	$y = x^A$	2.4 — 4.3	Подвійна інжекція в напівпровідник
Cu 50 хв long	$y = x^A$	26.6 — 32.9	Подвійна інжекція в напівпровідник
Cu 30 хв fast	$y = x^A$	0.03 — 17.9	Подвійна інжекція в напівпровідник
Cu 50 хв fast	$y = x^A$	1.1 — 3.8	Подвійна інжекція в напівпровідник

ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломної роботи було розглянуто електрофізичні властивості структури меланін / пористий кремній, описано основні сфери застосування цих структур в пристроях. В практичній частині було проаналізовано вольт-амперні характеристики за допомогою диференціального аналізу.

В першому розділі розглянуто класифікацію, властивості і застосування меланінів в біоелектроніці та їх перспективи на майбутнє. Було показано, що меланін здатний розсіювати 99% поглиненого УФ і видимого випромінювання не радіаційними засобами, що робить його оптимальним фото-захисником. Також, показано, що меланін є люмінесцентним матеріалом під УФ та видимим світлом, однак із надзвичайно слабким сигналом випромінювання. Описано перенос протонного і електронного носія заряду в гідратованому еумеланіні у вигляді тонких плівок, висновки говорять про те, що процеси на електродах визначають електричний відгук плівки. Описаний основний напрям застосування та проблеми з якими стикнулись вчені.

В другому розділі проаналізовано електрофізичні властивості структури пористий кремній в основних напрямках застосування. Розглянуто метод утворення пористого кремнію та переваги цього методу. Також, розглянуто вплив пористого шару кремнію на вольт-амперну характеристику. Описано застосування пористого кремнія в сонячних батареях, та застосування в інтегрований оптоелектроніці на основі Por-Si і майбутні очікування від цього напрямку.

В практичній частині були проаналізовані вольт-амперні характеристики досліджуваних зразків, та оброблено диференціальним методом криві ВАХ для визначення механізмів переносу заряду. Було визначено що основний внесок в механізми переносу заряду робить технологія отримання пористого кремнію,

зокрема матеріал металевих частинок. При цьому механізм інжекції змінюється від режиму постійного поля для зразків отриманих з використанням золота до режиму постійної інжекції у напівпровідник при використанні міді.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ehsan Vahidzadeh, Aarat P. Kalra and Karthik Shankar, Melanin-based electronics: From proton conductors to photovoltaics and beyond, 2018. — P. 7-8.
2. Julia Wunsche, Yingxin Deng, Prajwal Kumar, Eduardo Di Mauro, Erik Josberger, Jonathan Sayago, Alessandro Pezzella, Francesca Soavi, Fabio Cicoira, Marco Rolandi, and Clara Santato, Protonic and Electronic Transport in Hydrated Thin Films of the Pigment Eumelanin, 2015. P — A-G
3. Albertus B. Mostert^a, Benjamin J. Powell^a, Francis L. Pratt^b, Graeme R. Hanson^c, Tadeusz Sarnad^d, Ian R. Gentle^e, and Paul Meredith^a, Role of semiconductivity and ion transport in the electrical conduction of melanin, 2012. — P. 8943.
4. Paul Meredith, Kristen Tandy, and Albertus B. Mostert, A Hybrid Ionic–Electronic Conductor: Melanin, the First Organic Amorphous Semiconductor? , 2013, — P. 104-106.
5. Zhong, C., Deng, Y., Roudsari, A.F., Kapetanovic, A., Anantram, M.P., and Rolandi, M., 2011. — P. 2.
6. McGinness, J., Corry, P., and Proctor, P., 1974. — P. 853
7. Karl Svennersten, Karin C. Larsson, Magnus Berggren, Agneta Richter-Dahlfors, Organic bioelectronics in nanomedicine, 2010. P — 276
8. V. Lehmann and U. Gösele, Appl. Phys. Lett. 58, 1991. P — 856
9. Hamid Ghorbani Shiraz, Fatemeh Razi Astaraei, Omid Tavakoli, Seyed Hamed Mousavi, Fereshteh Rahimi, The Effect of a Porous Layer on I-V Characterization of a Polysilicon p-n Junction, 2016. P — 1-6

10. Wisam J. Aziz *, Asmiet Ramizy, K. Ibrahim, Z. Hassan, Khalid Omar, The effect of anti-reflection coating of porous silicon on solar cells efficiency, 2010. P — 1462-1465

11. Dong Hee Shin, Ju Hwan Kim, Jung Hyun Kim, Chan Wook Jang, Sang Woo Seo, Ha Seung Lee, Sung Kim, Suk-Ho Choi, Graphene/porous silicon Schottky-junction solar cells, 2017. P — 291-295

12. G. Barillaro, A. Diligenti, M. Piotto, M. Allegrini, F. Fuso, L. Pardi, Non-constant anodization current effects on spectra of porous silicon LEDs, 2003. P — 266-269

13. Kozak, A., Stievater, H., Pruessner, W., Kerry, N., and Rabinovich, S. Porous silicon MEMS infrared filters for micromechanical photo thermal spectroscopy, 2014. P — 197-203

14. Mohammad, W., Wilson, C., and Kaajakari, V. Introducing porous silicon as a getter using the self aligned maskless process to enhance the quality factor of packaged MEMS resonators, 2011. P — 1-4

15. Raghvendra S. Dubey, Passive and Active Optical Components for Optoelectronics Based on Porous Silicon, 2016. P — 100-101

16. Ivo Rendina, Ilaria Rea, Lucia Rotiroti, Luca De Stefano, Porous silicon-based optical biosensors and biochips, 2007. P — 188-192

17. V. V. Naumov, P.S. Smertenko, Injection technique for the study of solar cell test structures, 2003. P — 613-622